基于Logistic回归分析的土壤盐渍化易发性评价
——以新疆南疆塔里木灌区为例

蒋 磊[1,2]， 刘小龙[1]， 郭 帅[1]， 何 亮[1]， 邢建磊[1]， 郭俊杰[1]
(1. 中国地质调查局乌鲁木齐自然资源综合调查中心，新疆 乌鲁木齐 830057；
2. 中国地质大学(武汉)环境学院，湖北 武汉 430078)

摘 要：新疆南疆(简称南疆)的土地资源利用潜力巨大，是我国重要的后备耕地资源供给区，开展土壤盐渍化易发性评价，对于南疆增水增地选区与土地分区分类治理具有重要参考意义。以南疆塔里木灌区为研究对象，基于地下水溶解性固体总量(TDS)、地下水埋深、土壤质地、地貌类型、土地利用类型、土壤含盐量等实地调查数据，采用数据驱动方式的证据权进行土壤盐渍化单因素空间相关性分析，并通过Logistic回归模型进行多因素综合定量评价土壤盐渍化易发性。结果表明：(1) 高的地下水TDS、浅的地下水埋深、细颗粒的土壤质地以及地貌类型中的冲(湖)积平原、土地利用类型中的草地与高土壤含盐量地区表现出较高的正空间相关性。(2) 灌区冲积平原内的古河道，湖积平原内的古湖沼等槽型、封闭洼地是土壤盐渍化高易发区，面积约29 km^2，占灌区总面积的1.3%；灌区农田周边的弃耕地为土壤盐渍化中易发区，面积约453 km^2，占灌区总面积的20.5%；灌区周边广阔的沙漠及水域为土壤盐渍化低易发区，面积约1726 km^2，占灌区总面积的78.2%。(3) 综合模型评价置信度结果及野外实地调查现状表明，Logistic回归模型综合定量评价土壤盐渍化易发性的结果准确可靠，为土壤盐渍化易发性评价提供了新思路，也为南疆地区土壤盐渍化防治和后备耕地资源选区提供了科学依据。

关 键 词：土壤盐渍化；Logistic回归分析；易发性评价；塔里木灌区；新疆南疆
文章编号：1000－6060(2023)11－1858－10(1858～1867)

当前，由于气候增温、水资源配置调整等因素，新疆南疆(简称南疆)的土壤盐渍化演变过程愈发加快，并产生了土地退化、生态环境恶化等一系列问题，严重威胁着灌区农业生产和人类生活[1]。引发土壤盐渍化的原因较多，但无论是自然成因还是人类活动诱发，渐进性是制约其被早期发现的主要因素[2]。尽管现在有较为成熟的物理、化学、生物等多种改良技术[3-4]，但提前预防土壤盐分积累总比后期土壤脱盐更为经济有效。根据定义，土壤盐渍化易发性是指由一种或多种土壤功能受到不利影响，而导致发生盐渍化的可能性和严重性的程度[5]。在南疆农业灌区，土壤盐渍化在垂直、水平和时间上变化很大，这取决于地形、地貌、土壤质地、地下水埋深、灌溉水质、灌排系统等基础条件的变化[6-7]。从这个意义上讲，任何有效的评价方法都必须基于有意义的“水土”指标，以评估土壤是否可能受到盐渍化的危害。

关于土壤盐渍化易发性评价，目前采用的方法主要有人工神经网络法、主成分分析法、层次分析法等，这些方法只能根据研究区内有限的地下水位数据进行计算，且对地质参数方面也有较多约束，评价精度较低，适用范围较小[8-10]。因此，较为精确

收稿日期：2023-02-21； **修订日期**：2023-03-14
基金项目：第二师铁门关市科技计划项目(2023HZ0101)；中国地质调查局项目(DD20230740，DD20230484)资助
作者简介：蒋磊(1987-)，男，硕士，高级工程师，主要从事生态地质调查方面的研究. E-mail: 394465421@qq.com
通讯作者：郭俊杰(1988-)，男，本科，高级工程师，主要从事地质调查信息化方面的研究. E-mail: 526705775@qq.com

的、适用范围较广的土壤盐渍化程度易发性评价方法值得深入研究。Grundy等[11]针对澳大利亚昆士兰州提出了由4部分组成的土壤盐渍化预防风险评估框架，包括土壤盐渍化阶段、土地管理状况、受威胁资产的价值和生物物理风险等，最终给出土壤盐渍化风险指数。Zhou等[12]根据经济合作与发展组织的概念性压力-状态-响应可持续性框架，提出一种土壤盐渍化风险评估方法，并选择14个风险因素来评价银川平原土壤盐渍化的综合风险指数。以往这些研究主要侧重于预测已发生土壤盐渍化土地的发展趋势，而针对大面积灌区土地的土壤盐渍化易发性评价目前受到的关注较少。

因为土壤盐渍化的形成是多种因素综合作用的结果，在土壤盐渍化易发性评价中各类影响因子间所包含的信息往往有重叠部分，以固定权值和量化值将各因素进行加权线性叠加，会带入人为干扰，同时需要将大量信息重复计算[13]。为避免上述问题，本次评价工作创新采用非人为干扰的加权Logistic回归作为叠加函数，并以南疆塔里木灌区为例，通过筛选调查过程中较易获取的基础数据，提出以地下水溶解性固体总量(TDS)、地下水埋深、土壤质地、地貌类型、土地利用类型等作为土壤盐渍化易发性评价指标，进行多因素综合定量评价，最后划分出灌区内土壤盐渍化易发性程度，以期为南疆土壤盐渍化预防和土地分区分类治理提供科学的参考依据。

1　研究区概况

研究区位于塔里木盆地东端(86°34′~88°00′E，40°30′~41°05′N)、塔里木河下游的新疆生产建设兵团(简称兵团)第二师塔里木灌区(图1)。该区属于典型的大陆性荒漠干旱气候区，降雨稀少，年均降雨量34.7 mm，蒸发量大，年均蒸发量2408.6 mm[14]。研究区北部为天山南麓海陆相地层，分布有元古界、古生界侏罗系、新生界新近系、第四系地层，基岩以碎屑岩、碳酸盐岩建造为主。区内地势平坦，水力坡度小，细颗粒含水层渗透能力弱、径流缓慢导致地下水滞留形成壅水，且地表水及地下水含盐量较高，是南疆地表水、地下水汇聚排泄区和水系下游闾尾汇集区，也是盆地及周边山地盐分的聚集地[15-16]。研究区的细土平原地带以积盐作用为主，低洼中心则以蒸发浓缩作用[17]为主，从而导致土壤含盐量较高(图2a)。

以上地质背景表明，研究区的原生本底就是含盐母质，属于易发育盐碱地的原生环境。加之，近年来塔里木河下游地区农业灌溉用水增多，接受地表渠系灌溉漫溢和田间节水滴灌入渗补给增多，使得地下水位有所上升，土壤中盐分随水分垂直运动聚集于地表，极易在灌区范围产生土壤盐渍化问题，从而引起多种自然环境灾害[18-19]。土壤盐渍化的形成取决于各种内外营力作用，但原生地质条件决定着盐渍化土壤易发性程度，因此通过地质本底

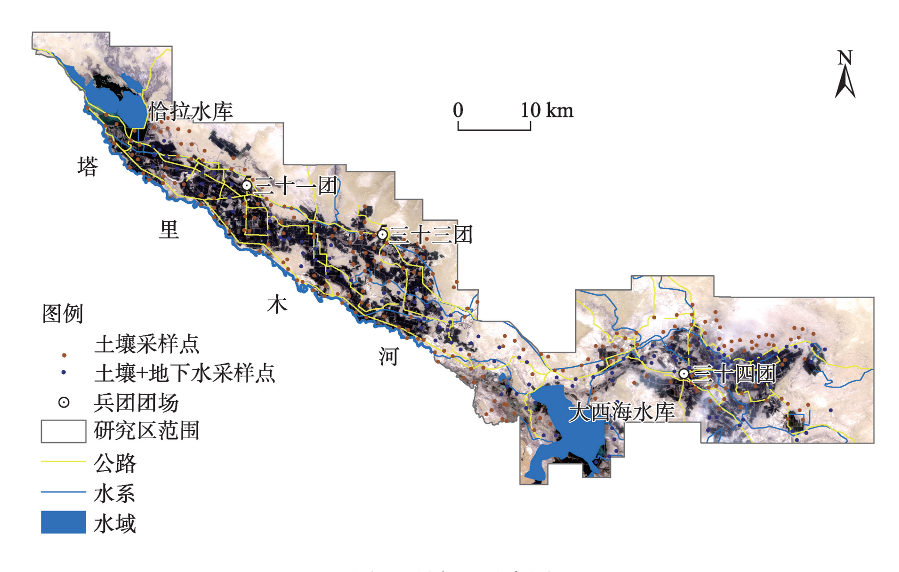
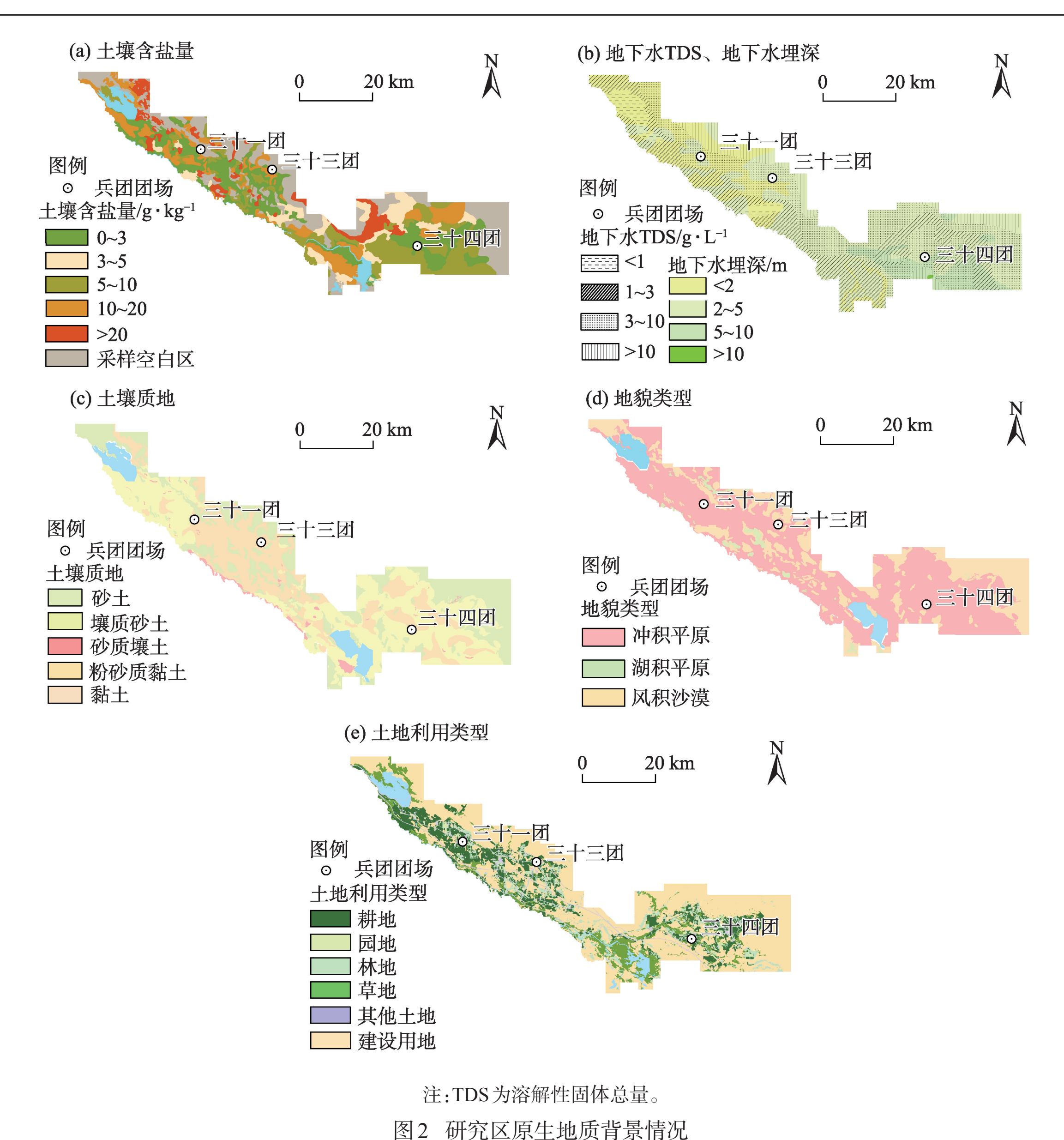


图1　研究区示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the study area



注:TDS为溶解性固体总量。

图2 研究区原生地质背景情况

Fig. 2 Primary geological background of the study area

调查,获取基础数据后进行综合分析,就能够更加精准的开展土壤盐渍化的易发性评价。

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

本次数据来源于研究区2020年4—5月开展的1:50000生态地质调查,调查面积约2208 km^2,采用穿越法,按照点距和线距2 km,开展以"水土"性质为主的生态地质调查。调查过程中尽可能穿越不同地貌类型区,荒漠区点距和线距适当放稀,细土平原区适当加密,并详细记录地貌类型的变化情况。每个调查点利用土壤取样器采集土壤样品,向下尽量取至含水层,并采集地下水样品,记录点位坐标、地貌类型、土壤性质、厚度、地下水埋深等数据。共采集0~50 cm的土壤样品360个,经室内加工后送至新疆有色地质勘查局测试中心,分析土壤质地、全盐量、K^+、Ca^{2+}、Na^+、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}、CO_3^{2-}、HCO_3^-等项目;共采集地下水样品126个,经处理后送至新疆地质矿产开发局第三地质大队化验室,分析TDS、K^+、Ca^{2+}、Na^+、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}、CO_3^{2-}、HCO_3^-等项目。其中,土壤质地使用国际制土壤质地分类标准,并采用激光粒度仪分析法进行测定,全盐量采用重量法测定,CO_3^{2-}、HCO_3^-采用双指示剂滴定法测定,Cl^-采用硝酸银滴定法测定,SO_4^{2-}采用乙二胺四乙酸(EDTA)间接滴定法测定,Ca^{2+}、Mg^{2+}采用EDTA络

合滴定法测定，K^+、Na^+采用差减法测定；地下水中主要阳离子K^+、Ca^{2+}、Na^+、Mg^{2+}采用电感耦合等离子体发射光谱仪测定，阴离子Cl^-、SO_4^{2-}采用离子色谱仪测定，CO_3^{2-}、HCO_3^-采用电位滴定法测定，TDS值由现场取样测定，使用仪器为哈希便携式水质分析仪。土地利用类型数据信息源为Landsat-TM/ETM+影像，时间为2019年5月，空间分辨率2.5 m，参照《土地利用现状调查技术规程》进行预处理、监督分类后获得相关分区。

数据处理主要包括3方面：(1) 矢量-栅格转换，主要用于将地貌类型、土壤质地等面要素转换为栅格数据；(2) 插值分析，主要用于地下水埋深、地下水TDS等点状要素进行插值分析，获得连续型栅格数据；(3) 重分类分析，对插值分析后获得的连续型栅格数据按一定类别区间进行重分类，获得整型栅格数据，栅格像元大小为25 m×25 m，评价单元大小为1 km^2，能够满足土壤盐渍化易发性评价对数据的要求。

2.2 研究方法

2.2.1 土壤盐渍化单因素空间相关性分析　本次评价采用数据驱动方式的证据权单因素分析法，通过评价已知高土壤含盐量点和各种影响因子之间的空间分布特征，计算影响因子与高土壤含盐量点间的空间相关性，并通过2个量化值体现，即W^+和W^-[20-21]。其中，W^+是影响因素中某一类别存在时对土壤盐渍化的影响程度量化指标；W^-是影响因素中某一类别缺失时对土壤盐渍化的影响程度量化指标；二者综合影响可通过W^+和W^-组合进行空间相关性判断。$W^+>0$或$W^-<0$表示土壤盐渍化与影响因素中的某一类别正相关，绝对值越大，空间正相关性越强；$W^+<0$或$W^->0$表示负相关，且绝对值越大，空间负相关性越强。计算公式如下：

$$W^+=\ln\frac{P\{B|D\}}{P\{B|\bar{D}\}};\tag{1}$$

$$W^-=\ln\frac{P\{\bar{B}|D\}}{P\{\bar{B}|\bar{D}\}};\tag{2}$$

$$P\{B|D\}=\frac{N\{B\cap D\}}{N\{D\}},\ P\{B|\bar{D}\}=\frac{N\{B\cap\bar{D}\}}{N\{\bar{D}\}},$$

$$P\{\bar{B}|D\}=\frac{N\{\bar{B}\cap D\}}{N\{D\}},\ P\{\bar{B}|\bar{D}\}=\frac{N\{\bar{B}\cap\bar{D}\}}{N\{\bar{D}\}}$$

式中：$P\{\}$为单元格内单因素的相关性程度；D为网格单元含有已知土壤盐渍化的点数；$\bar{D}$为不含土壤盐渍化的点数；B为单因素存在的网格单元总数；$\bar{B}$为单因素不存在的网格单元总数；$N\{\}$为影响因子中各响应因子占据的像元个数。

为了便于比较和度量，将W^+与W^- 2个值合成为一个反差值以C表示，C值提供了度量土壤盐渍化空间分布和影响因子之间相关性的有效依据，同时C值和W值也提供了一种将多分类影响因子综合为较少类别影响因子数据的依据。计算公式如下：

$$C=W^+-W^-\tag{3}$$

2.2.2 土壤盐渍化多因素综合定量评价　本次评价采用Logistic回归模型法，该方法建立在广义线性回归的基础上，是在一个因变量和多个自变量之间形成的多元回归关系，并依此对某一事件的发生概率值进行预测或评价[22-23]。现假定有P个影响因子参与土壤盐渍化易发性评价；另外需要一个响应因子(即已发生土壤盐渍化点的空间分布)，它包含2类数据：(1) 已发生土壤盐渍化点的个数；(2) 已形成土壤盐渍化的插值栅格数据，栅格数据中各像元的值用2个值表现，即形成($\theta_i=1$)，或未形成($\theta_i=0$)。此时，研究区中任意像元i中发生土壤盐渍化的概率(θ_i)可以用P个影响因子的函数表示，如下：

$$\theta_i=f(X_{i1},X_{i2},\cdots\cdots,X_{iP})\tag{4}$$

$$\theta_i=X'_ib\tag{5}$$

式中：$X'_i=(1,X_{i1},X_{i2},\cdots,X_{iP})$为$P$+1维常数向量；$X_{iP}$为第$P$个影响因子的重要程度；$b$为$P$+1个待估计的回归参数，常用最小二乘法估计该参数。

最后用最大似然率法估计第i个像元回归参数b的值，进一步得到该像元土壤盐渍化发生的概率，并获得研究区盐渍化易发性定量评价结果，加权Logistic回归模型方程如下：

$$\mathrm{Logit}(\theta_i)=\mathrm{Log}_e\left(\frac{\theta_i}{1-\theta_i}\right)=X'_ib\tag{6}$$

3 结果与分析

3.1 土壤盐渍化单因素空间相关性分析

3.1.1 地下水TDS　研究区浅层地下水TDS总体为3~10 g·L^{-1}，塔里木河道两侧500 m范围内受到河水补给为淡化带，塔里木河北侧1~3 km为地下水低TDS带，局部湖沼地区、沙漠覆盖区为地下水高TDS

带(图2b),总体按照河漫滩-冲积平原-湖沼地区-沙漠覆盖区顺序,地下水TDS由低到高。通过空间相关性分析计算显示,研究区地下水TDS与高土壤含盐量点在空间上相关性较低,最高正相关性指标值为1.13(表1)。从土壤盐渍化单因素空间相关性示意图(图3a)可以看出,仅在水库周边及地下水埋深较浅处显示一定的正空间相关性。

3.1.2 地下水埋深 研究区地下水埋深范围为0.5~10 m,垂直塔里木河道两侧靠近河岸的绿洲区、水库周边埋深相对较浅,沙漠覆盖区埋深较深,总体沿着塔里木河向下游方向埋深逐渐变深(图2b)。通过空间相关性分析计算显示,研究区地下水埋深与高土壤含盐量点在空间上具有显著相关性,具体表现在浅的地下水埋深与高土壤含盐量点表现出极强的正空间相关性,最高正相关性指标值为2.81(表1)。从土壤盐渍化单因素空间相关性示意图(图3b)可以看出,高正空间相关性区域主要分布在塔里木河上游的地下水埋深较浅区域。

3.1.3 土壤质地 研究区塔里木河道附近以壤质砂土为主;河漫滩上层为薄层粉砂质黏土,下部为砂质壤土;冲积平原表层多为粉砂质黏土,中间夹有黏土-壤质砂土混杂层;湖沼沉积区浅层多为黏土或粉砂质黏土,下部为壤质砂土;沙漠地区多为厚层砂土(图2c)。通过空间相关性分析计算显示,研究区土壤质地与高土壤含盐量点在空间上具有显著相关性,具体表现在粉砂质黏土、黏土等细颗粒土壤与高土壤含盐量点表现出极强的正空间相关性,最高正相关性指标值为3.62(表1)。从土壤盐渍化单因素空间相关性示意图(图3c)可以看出,高正空间相关性区域主要分布在塔里木灌区冲积平原及湖沼沉积区粉砂质黏土、黏土等细颗粒土壤分布区。

3.1.4 地貌类型 研究区地貌类型划分为冲积平原、湖积平原和风积沙漠。冲积平原主要分布在沿塔里木河两侧的狭长地带,由于历史河道的摆动,冲积平原区分布着较多辫状古河道;湖积平原主要

表1 不同单因素与研究区高土壤含盐量点空间相关性分析结果

Tab. 1 Results of spatial correlation analysis between different single factors and high soil salt content in the study area

单因素分类		单元数	盐渍化点	W^+	W^+方差	W^-	W^-方差	C值	C值方差	显著性指标
地下水TDS	<1 g·L^{-1}	793	26	0.10	0.20	−0.06	0.16	0.15	0.26	0.60
	1~3 g·L^{-1}	40	1	−0.18	1.01	0.00	0.13	−0.18	1.02	−0.18
	3~10 g·L^{-1}	616	12	−0.44	0.29	0.13	0.14	−0.57	0.32	−1.76
	>10 g·L^{-1}	760	27	0.18	0.20	−0.11	0.16	0.29	0.25	1.13
地下水埋深	<2 m	927	39	0.36	0.16	−0.36	0.19	0.71	0.25	2.81
	2~5 m	652	16	−0.20	0.25	0.07	0.14	−0.28	0.29	−0.95
	5~10 m	459	11	−0.23	0.31	0.05	0.14	−0.28	0.33	−0.83
	>10 m	171	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
土壤质地	砂土	628	3	−1.86	0.58	0.30	0.13	−2.16	0.59	−3.64
	壤质砂土	808	27	0.12	0.20	−0.07	0.16	0.19	0.25	0.74
	砂质壤土	6	1	1.85	1.09	−0.01	0.13	1.86	1.10	1.69
	粉砂质黏土	33	3	1.18	0.61	−0.03	0.13	1.21	0.62	1.96
	黏土	622	32	0.57	0.18	−0.34	0.17	0.91	0.25	3.62
地貌类型	冲积平原	59	5	1.11	0.47	−0.05	0.13	1.16	0.49	2.39
	湖积平原	1446	57	0.29	0.14	−0.95	0.34	1.24	0.36	3.42
	风积沙漠	588	4	−1.50	0.50	0.26	0.13	−1.76	0.52	−3.40
土地利用类型	耕地	385	8	−0.37	0.36	0.06	0.13	−0.44	0.38	−1.15
	园地	134	6	0.61	0.70	−0.01	0.13	0.62	0.71	0.86
	林地	20	2	1.31	1.06	−0.01	0.13	1.32	1.07	1.24
	草地	190	22	1.45	0.23	−0.32	0.15	1.77	0.27	6.48
	建设用地	69	2	−0.03	0.72	0.00	0.13	−0.04	0.73	−0.05
	其他土地	1204	26	−0.08	0.63	−0.01	0.14	−0.07	0.66	0.06

注:W^+为某个单因素存在时对土壤盐渍化的影响程度;W^-为某个单因素缺失时对土壤盐渍化的影响程度;$C=W^+-W^-$,为W^+与W^-合成的反差值。

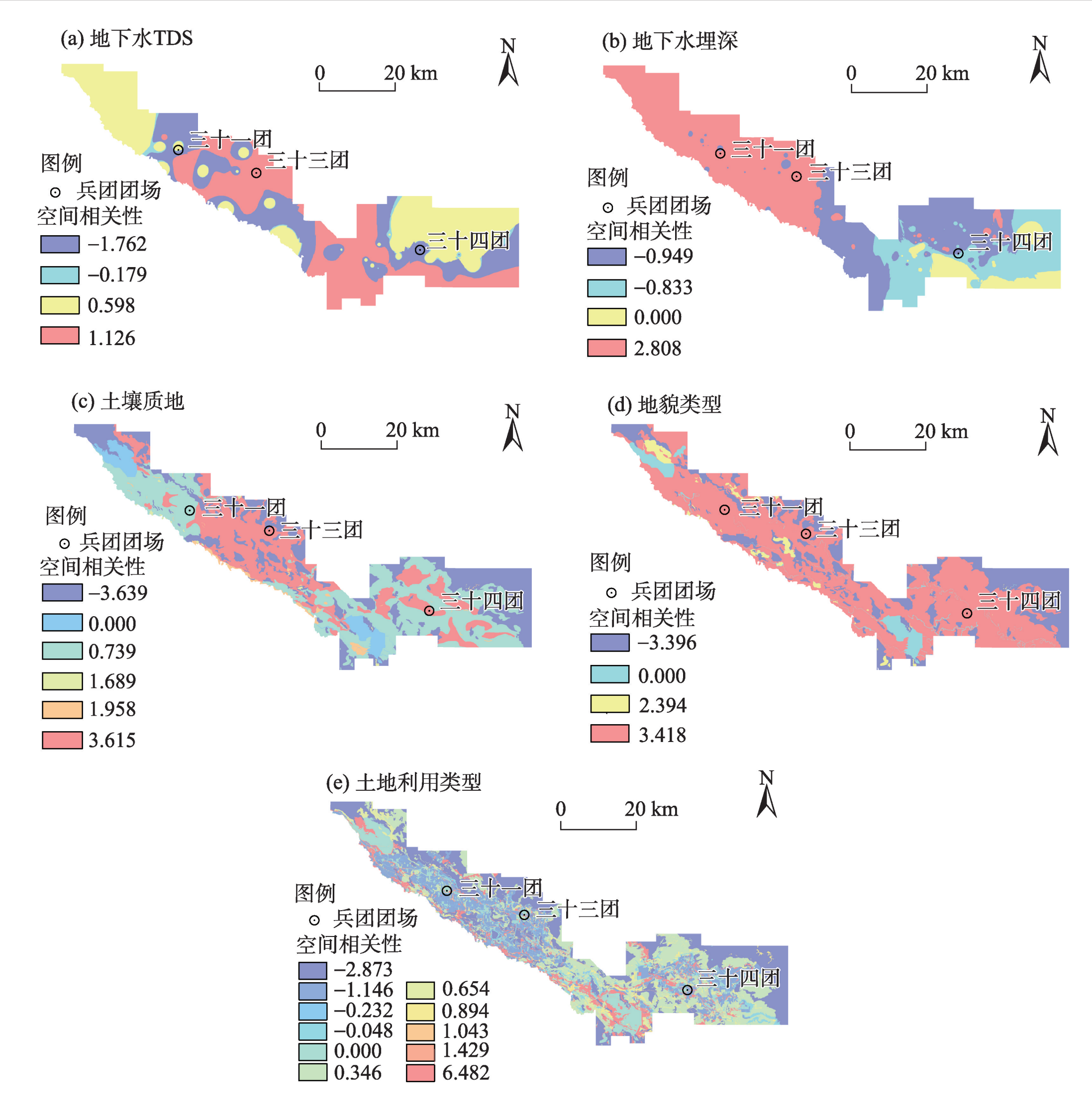


图3　土壤盐渍化单因素空间相关性示意图

Fig. 3　Spatial correlation diagram of single factor of soil salinization

分布在塔里木河北侧低洼、平坦的开阔地带，主要由干涸的牛轭湖和古湖沼组成；风积沙漠主要分布在塔里木河绿洲外侧（图2d）。通过空间相关性分析计算显示，研究区地貌类型与高土壤含盐量点在空间上具有显著相关性，具体表现在冲积平原、湖积平原与高土壤含盐量点表现出极强的正空间相关性，最高正相关性指标值为3.42（表1）。从土壤盐渍化单因素空间相关性示意图（图3d）可以看出，塔里木灌区分布众多高正空间相关性区，仅绿洲边缘沙漠地区显示负相关性。

3.1.5　土地利用类型　研究区土地利用类型简单，团场内部分布着耕地、园地、林地及少量建设用地，水库周边分布着草地，其他区域均为其他土地类型中的沙地、盐碱地（图2e）。通过空间相关性分析计算显示，研究区土地利用类型与高土壤含盐量点在空间上具有显著相关性，具体表现在天然草地与高土壤含盐量点表现出极强的正空间相关性，最高正相关性指标值为6.48（表1）。从土壤盐渍化单因素空间相关性示意图（图3e）可以看出，高正空间相关性区域主要分布在塔里木河两侧的湿地、草地区域。

3.2　土壤盐渍化多因素综合定量评价

基于以上单因素空间相关性分析结果，对地下水TDS、地下水埋深、土壤质地、地貌类型、土地利用类型5个单因素进行Logistic回归模型加权的综合定量分析，获得土壤盐渍化发生概率图，然后结合调查过程中已知的土壤盐渍化点位空间分布情况，对概率图重分类，将发生概率0.00~0.04定义为低易

发区、0.04~0.16定义为中易发区、0.16~0.44定义为高易发区,并得到土壤盐渍化易发性评价结果(图4)。

从评价结果来看,土壤盐渍化高易发区主要分布在灌区冲积平原的古河道、湖积平原的古湖沼等局部封闭洼地、槽型洼地,面积约29 km²,占灌区总面积的1.3%。由于地下水的径流排泄多向洼地汇集,造成洼地土壤次生盐渍化问题突出,甚至出现小型盐湖。土壤盐渍化中易发区主要分布在灌区农田周边的弃耕地,面积约453 km²,占灌区总面积的20.5%。由于排碱渠道堵塞和荒废现象比较常见,造成排水效果不良,甚至失去排水功能,农田盐碱水积压下渗造成局部地区盐碱化加重。土壤盐渍化低易发区主要分布在灌区内沙漠地区及水域,面积约1726 km²,占灌区总面积的78.2%。该区域植被非常稀疏,地势起伏不平,沙漠地区地下水位相对灌区内部较深,地表风沙积累较厚,不易发生盐渍化灾害。

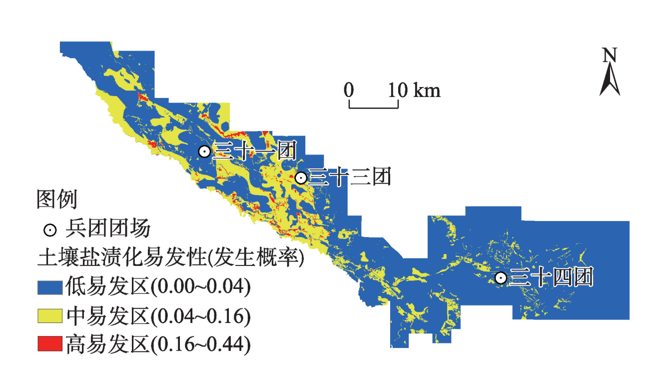


图4 土壤盐渍化易发性评价结果

Fig. 4 Evaluation result of soil salinization susceptibility

4 讨 论

土壤盐渍化会导致粮食产量降低、地表径流和地下水水质恶化、生物多样性锐减以及发生洪水和荒漠化风险的增加,而"水土"关系不畅是导致发生土壤盐渍化的主要原因[24-25]。其他学者在研究干旱区土壤盐渍化风险时,也得到了类似关系;Seydehmet等[26]发现土壤盐渍化高风险区与地势低洼、土壤母质含盐量高、地下水含盐量高、地下水埋深浅有关;Bouksila等[27]发现由于排水条件差、质地细腻和土壤导水性低导致发生土壤盐渍化的趋势增加;Kosmas等[28]认为土壤蓄水能力是发生土壤盐渍化的最重要指标,质地较细的土壤更容易发生盐渍化。

针对土壤盐渍化的形成是多种因素综合作用的结果,在使用人工神经网络法、主成分分析法、层次分析法等单模型评价时都有一定局限性。史晓杰等[29]利用人工神经网络法对疏勒河流域的昌马灌区土壤盐渍化敏感性进行了分析,但由于模型描述问题的层次不能过深,考虑的因素有限;谷新保等[30]利用主成分分析法对石河子棉田土壤表层盐渍化进行了评价,但该方法仅对土壤中八大离子互相间的关系与土壤盐渍化进行了研究,要素较为单一;王水献等[31]利用层次分析法对新疆平原灌区土壤盐渍化发生原因进行了分析,但该模型需要进行专家权重打分,有一定的人为因素干扰。

Logistic回归分析是一种广义的线性回归分析模型,最初多用于预测发生某种疾病的概率有多大,目前也广泛用于地质灾害的易发性评价[32]。本研究探索创新采用数据驱动方式的证据权法与Logistic回归模型结合的方式预测土壤盐渍化的易发性,评价时主要考虑2类因子,一类是评价因子,即对盐渍化形成具有影响的因素;另外一类是响应因子,即已发生土壤盐渍化点的空间分布。从显著性示意图(图5)以及各项显著性指标的置信度来看(表2),当显著性指标>1.282时,置信度>90%;从具体分布情况来看,土壤盐渍化高易发区均呈零星状分布在冲积平原的古河道、湖积平原的古湖沼等地区,这与野外实地调查显示这些地区为地下水埋深浅、土壤质地细密、排水不畅、地势低洼的现状是一致的,表明加权Logistic回归模型综合定量评价结果

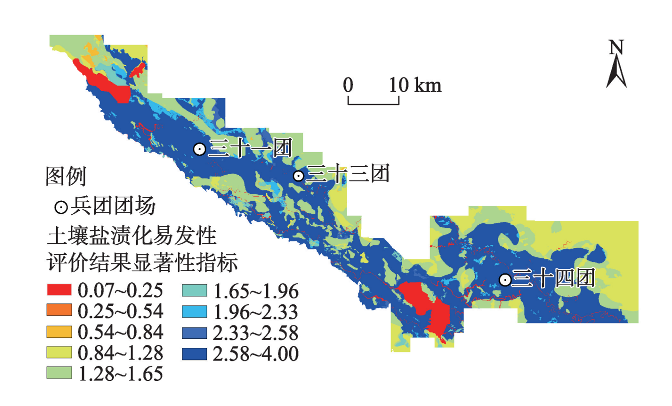


图5 土壤盐渍化易发性评价结果显著性

Fig. 5 Significant of soil salinization susceptibility evaluation results

表2　土壤盐渍化易发性评价结果显著性指标置信度

Tab. 2　Confidence degree of significance index of soil salinization susceptibility evaluation results

显著性指标	0.253	0.542	0.842	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576
置信度/%	60.00	70.00	80.00	90.00	95.00	97.50	99.00	99.50

是准确可靠的。

总之,从前述分析情况来看,塔里木灌区的原生地质背景就是含盐母质,属于易发育盐碱地原生环境。从长远来看,预防土壤盐渍化总比后期人为治理更为经济有效,因此鼓励农民更好地了解他们的土地,针对不同土壤盐渍化易发区及时开展分类治理,以便达到因地制宜的效果,这样才能更好地促进耕地质量保护与提升。

5　结　论

本研究围绕新疆南疆干旱区典型灌区土壤盐渍化易发性评价问题,分析了该区的地质背景,创新采用数据驱动方式的证据权法与Logistic回归模型结合的方式,以地下水TDS、地下水埋深、土壤质地、地貌类型、土地利用类型5个单因素为指标的评价体系,并通过综合定量分析评价,得出如下结论:

(1) 原生背景显示研究区地质本底就是含盐母质,属于易发育盐碱地原生环境,而地质条件的优劣决定着土壤盐渍化发育程度,通过调查选取有意义的"水土"指标,结合单因素空间相关性分析表明,高的地下水TDS、浅的地下水埋深、细颗粒的土壤质地以及地貌类型中的冲(湖)积平原、土地利用类型中的草地与高土壤含盐量地区表现出较高的正空间相关性。

(2) 通过多因素综合定量评价土壤盐渍化易发性可知,灌区内冲积平原的古河道、湖积平原的古湖沼等槽型、封闭洼地是土壤盐渍化高易发区,占灌区总面积的1.3%;灌区农田周边的弃耕地为土壤盐渍化中易发区,占灌区总面积的20.5%;灌区周边广阔的沙漠及水域为土壤盐渍化低易发区,占灌区总面积的78.2%。

(3) 综合模型评价置信度结果及野外实地调查现状表明,该模型评价土壤盐渍化易发性的结果准确可靠,也为土壤盐渍化易发性评价提供了新思路,今后可以为农民、农村规划者及土地资源管理者提供一种方法来识别土壤盐渍化易发区,并基于分区分类结果,选择适当的农艺策略和管理方案,从而避免土壤继续发生退化。

致谢：感谢中国科学院新疆生态与地理研究所田长彦研究员、赵振勇研究员在野外调查方面的指导,同时感谢新疆大学陈川教授在数据分析和图件制作中提供的帮助。

参考文献(References)

[1] 李丽君, 张小清, 陈长清, 等. 近20 a塔里木河下游输水对生态环境的影响[J]. 干旱区地理, 2018, 41(2): 238-247. [Li Lijun, Zhang Xiaoqing, Chen Changqing, et al. Ecological effects of water conveyance on the lower reaches of Tarim River in recent twenty years[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(2): 238-247.]

[2] 杨红梅, 徐海量, 樊自立, 等. 塔里木河下游表层土壤盐分空间变异和格局分析[J]. 中国沙漠, 2010, 30(3): 564-570. [Yang Hongmei, Xu Hailiang, Fan Zili, et al. Spatial variability and pattern of surface soil salinity in the lower reaches of the Tarim River [J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(3): 564-570.]

[3] 田长彦, 买文选, 赵振勇. 新疆干旱区盐碱地生态治理关键技术研究[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7064-7068. [Tian Changyan, Mai Wenxuan, Zhao Zhenyong. Study on key technologies of ecological management of saline alkali land in arid area of Xinjiang [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): 7064-7068.]

[4] 赵振勇, 田长彦, 张科, 等. 盐碱地生物改良与盐生植物资源综合利用[J]. 高科技与产业化, 2020(9): 64-66. [Zhao Zhenyong, Tian Changyan, Zhang Ke, et al. Biological improvement of saline-alkali land and comprehensive utilization of halophyte resources [J]. High-Technology & Commercialization, 2020(9): 64-66.]

[5] Tomaz A, Palma P, Fialho S, et al. Risk assessment of irrigation-related soil salinization and sodification in Mediterranean areas[J]. Water, 2020, 12(12): 3569, doi: 10.3390/w12123569.

[6] Castro F C, Araújo J F, dos Santos A M. Susceptibility to soil salinization in the quilombola community of Cupira-Santa Maria da Boa Vista-Pernambuco-Brazil[J]. Catena, 2019, 179: 175-183.

[7] Ma L G, Ma F L, Li J D, et al. Characterizing and modeling regional-scale variations in soil salinity in the arid oasis of Tarim Basin, China[J]. Geoderma, 2017, 305: 1-11.

[8] Alexandre C, Borralho T, Durão A. Evaluation of salinization and sodification in irrigated areas with limited soil data: Case study in southern Portugal[J]. Spanish Journal of Soil Science, 2018, 8: 102-120.

[9] 谢聪慧, 吴世新, 林娟, 等. 基于PSO-PNN模型的喀什噶尔绿洲

耕地盐渍化分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1547−1558. [Xie Conghui, Wu Shixin, Lin Juan, et al. Analysis of cultivated land salinization in Kashgar Oasis based on PSO-PNN model[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1547−1558.]

[10] 姚远, 丁建丽, 张芳, 等. 基于遥感的塔里木盆地北缘绿洲干湿季土地盐渍化监测[J]. 应用生态学报, 2013, 24(11): 3213−3220. [Yao Yuan, Ding Jianli, Zhang Fang, et al. Monitoring of soil salinization in northern Tarim Basin, Xinjiang of China in dry and wet seasons based on remote sensing[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(11): 3213−3220.]

[11] Grundy M J, Silburn D M, Chamberlain T. A risk framework for preventing salinity[J]. Environmental Hazards, 2007, 7(2): 97−105.

[12] Zhou D, Lin Z L, Liu L M, et al. Assessing secondary soil salinization risk based on the PSR sustainability framework[J]. Journal of Environmental Management, 2013, 128: 642−654.

[13] 牛增懿, 丁建丽, 李艳华, 等. 基于高分一号影像的土壤盐渍化信息提取方法[J]. 干旱区地理, 2016, 39(1): 171−181. [Niu Zengyi, Ding Jianli, Li Yanhua, et al. Soil salinization information extraction method based on GF-1 image[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(1): 171−181.]

[14] 蒋磊, 赵毅, 张鹏伟, 等. 基于氢氧稳定同位素特征的潜水蒸发影响程度研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1793−1800. [Jiang Lei, Zhao Yi, Zhang Pengwei, et al. Study on influence degree of phreatic evaporation based on hydrogen and oxygen isotope characteristics[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(6): 1793−1800.]

[15] 周龙, 杨鹏年, 王永鹏, 等. 塔里木河下游河段耗水特征与输水方式演变研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 144−154. [Zhou Long, Yang Pengnian, Wang Yongpeng, et al. Characteristics of water consumption and the evolution of water delivery methods in the lower reach of the Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 144−154.]

[16] 马松增, 史明昌, 杨贵森, 等. 基于GIS的土地利用时空动态变化分析——以塔里木盆地农垦区为例[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 177−181. [Ma Songzeng, Shi Mingchang, Yang Guisen, et al. Analysis on spatiotemporal change of land use based on GIS technology: Taking Xinjiang Tarim Basin as an example[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(1): 177−181.]

[17] 陈亚宁, 崔旺诚, 李卫红, 等. 塔里木河的水资源利用与生态保护[J]. 地理学报, 2003, 58(2): 215−222. [Chen Yaning, Cui Wangcheng, Li Weihong, et al. Utilization of water resources and ecological protection in the Tarim River[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(2): 215−222.]

[18] 谢海霞, 龚江, 何帅. 膜下滴灌农田灌溉量对土壤盐分类型的影响[J]. 河南农业科学, 2013, 42(8): 45−47. [Xie Haixia, Gong Jiang, He Shuai. Influence of irrigation amount of mulched drip irrigation on type of soil salt[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2013, 42(8): 45−47.]

[19] 陈亚宁, 陈忠升. 干旱区绿洲演变与适宜发展规模研究——以塔里木河流域为例[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 134−140. [Chen Yaning, Chen Zhongsheng. Analysis of oasis evolution and suitable development scale for arid regions: A case study of the Tarim River Basin[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(1): 134−140.]

[20] 王雪冬, 张超彪, 王翠, 等. 基于Logistic回归与随机森林的和龙市地质灾害易发性评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(6): 1957−1970. [Wang Xuedong, Zhang Chaobiao, Wang Cui, et al. Geological disaster susceptibility in Helong City based on Logistic regression and random forest[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(6): 1957−1970.]

[21] 阿如旱, 都来, 盛艳, 等. 基于Logistic回归模型的内蒙古多伦县土地沙漠化驱动力分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(1): 137−143. [Aruhan, Du Lai, Sheng Yan, et al. Driving forces on land desertification in Duolun County lnner Mongolia based on Logistic regress model[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(1): 137−143.]

[22] 高会, 谭莉梅, 刘鹏, 等. 基于二分类Logistic回归模型的太行山丘陵区县域耕地资源潜力估算[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(4): 490−497. [Gao Hui, Tan Limei, Liu Peng, et al. Estimation of arable land resources potential in hilly area of Taihang Mountain based on binary Logistic regression model[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(4): 490−497.]

[23] 樊芷吟, 苟晓峰, 秦明月, 等. 基于信息量模型与Logistic回归模型耦合的地质灾害易发性评价[J]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 340−347. [Fan Zhiyin, Gou Xiaofeng, Qin Mingyue, et al. Information and Logistic regression models based coupling analysis for susceptibility of geological hazards[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(2): 340−347.]

[24] 黄湘, 陈亚宁, 马建新. 西北干旱区典型流域生态系统服务价值变化[J]. 自然资源学报, 2011, 26(8): 1364−1376. [Huang Xiang, Chen Yaning, Ma Jianxin. Analysis of the ecosystem services value of the typical river basin in desert areas of northwest China[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(8): 1364−1376.]

[25] 邓铭江, 樊自立, 徐海量, 等. 塔里木河流域生态功能区划研究[J]. 干旱区地理, 2017, 40(4): 705−717. [Deng Mingjiang, Fan Zili, Xu Hailiang, et al. Ecological function regionalization of Tarim River Basin[J]. Arid Zone Research, 2017, 40(4): 705−717.]

[26] Seydehmet J, Lü G H, Abliz A, et al. Irrigation salinity risk assessment and mapping in arid oasis, northwest China[J]. Water, 2018, 10(7): 966, doi: 10.3390/w10070966.

[27] Bouksila F, Bahri A, Berndtsson R, et al. Assessment of soil salinization risks under irrigation with brackish water in semiarid Tunisia[J]. Environmental and Experimental Botany, 2013, 92: 176−185.

[28] Kosmas C, Kairis O, Karavitis C, et al. Evaluation and selection of indicators for land degradation and desertification monitoring: Methodological approach[J]. Environmental Management, 2014, 54: 951−970.

[29] 史晓杰, 张玉, 孙涛, 等. 基于遗传人工神经网络的土壤盐渍化敏感性分析模型[J]. 水文地质工程地质, 2008(4): 116−119. [Shi

Xiaojie, Zhang Yu, Sun Tao, et al. Soil salinization sensitivity analysis model based on genetic artificial neural network[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008(4): 116−119.]

[30] 谷新保, 虎胆·吐马尔白, 翟永先, 等. 主成分分析法在膜下滴灌不同年限棉田土壤表层盐渍化评价中的应用[J]. 新疆农业科学, 2009, 46(5): 935−940. [Guo Xinbao, Tumaerbai Hudan, Zhai Yongxian, et al. Application of salinization evaluation to soil upper layer of cotton field under film irrigation by main component analytical method in different years[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 46(5): 935−940.]

[31] 王水献, 董新光, 刘丰. 层次分析法在新疆平原灌区土壤盐渍化研究中的应用[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(4): 111−116. [Wang Shuixian, Dong Xinguang, Liu Feng, et al. Application of analytic hierarchy process on the soil salinization in irrigation areas of Xinjiang plain[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(4): 111−116.]

[32] 陈朝亮, 张文君, 钱静, 等. 基于改进Logistic回归模型在地质灾害评价中的应用[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(4): 188−193, 213. [Chen Caoliang, Zhang Wenjun, Qian Jing, et al. Application of improved Logistic regression model in geological hazard evaluation[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(4): 188−193, 213.]

Evaluation of soil salinization susceptibility based on Logistic regression analysis: A case of Tarim irrigation area in southern Xinjiang

JIANG Lei[1,2], LIU Xiaolong[1], GUO Shuai[1], HE Liang[1], XING Jianlei[1], GUO Junjie[1]

(1. Urumqi Center of Natural Resources Comprehensive Survey, China Geological Survey, Urumqi 830057, Xinjiang, China;
2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430078, Hubei, China)

Abstract: The southern region of Xinjiang has great potential for land resource utilization and is a crucial reserve supplying cultivated land resources in China. Evaluating soil salinization susceptibility in this area is necessary, as it aids in making informed decisions regarding water and land selection and land zoning management in southern Xinjiang. Sources, including total dissolved solids (TDS) in groundwater, groundwater depth, soil texture, geomorphic type, land-use type, and soil salt content, were collected via field surveys. By employing data-driven evidence weight, the spatial correlations of a single factor contributing to soil salinization were analyzed, followed by a multifactor comprehensive quantitative evaluation of soil salinization using a Logistic regression model. The results showed the following: (1) Shallow groundwater depth, high groundwater TDS, fine-grained soil, alluvial (lacustrine) plain geomorphology, and grassland land-use types showed strong positive spatial correlation with high soil salt content. (2) High soil salinization-prone areas were identified, encompassing the ancient channel in the alluvial plain and ancient lake marsh in the lacustrine plain, covering ~29 km^2 and accounting for 1.3% of the total area. Additionally, abandoned farmland around the irrigated area was a prone area of soil salinization, covering ~453 km^2, accounting for 20.5% of the total area. In contrast, the vast desert and water areas around the irrigated area exhibited a low salinization-prone area of ~1726 km^2, accounting for 78.2% of the total irrigated area. (3) The comprehensive evaluation using the Logistic regression model was validated with field investigation, affirming its accuracy and reliability. This comprehensive quantitative assessment of soil salinization susceptibility provides a scientific basis for soil salinization prevention and control measures and for making informed decisions regarding the selection of reserved cultivated land resources in southern Xinjiang.

Key words: soil salinization; Logistic regression analysis; susceptibility evaluation; Tarim irrigation area; southern Xinjiang